

DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧ З ШИРОКИМ ДІАПАЗОНОМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕЖИМУ ПРИРОДНОЇ КОМУТАЦІЇ В НУЛЯХ НАПРУГИ

А. Б. БЛІНОВ^{1*}, Д. В. ВІННИКОВ¹, В. В. ІВАХНО², В. В. ЗАМАРУЄВ², Б. О. СТИСЛО²

¹ Таллінський технологічний університет, Таллінн, Естонія

² кафедра «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «ХПІ», Харків, Україна

*e-mail: andrei.blinov@ttu.ee

АНОТАЦІЯ В статті описано принцип та режими роботи дволанкового DC-DC перетворювача з проміжною ланкою змінного струму, традиційним вхідним інвертором напруги та активним випрямлячем у вторинній ланці. Конвертор має асиметричну структуру в ланці вихідного інвертора. Керування ключами двох ланок здійснюється із фазовим зсувом. Забезпечення режиму м'якої комутації силових ключів обох ланок перетворювача при малій потужності навантаження відбувається без надмірного значення величини намагнічуючого або циркулюючого струму. Новий принцип керування перетворювачем дозволяє забезпечувати режими м'якої комутації ключів обох ланок при широкому діапазоні зміни струму, у тому числі при близького до нуля значенні навантаження. Режим роботи перетворювача має короткий додатковий інтервал комутації, що мінімізує циркуляцію енергії. Цей інтервал забезпечує перезарядження снаберної ємності на стороні інвертора напруги. Рішення спрямоване на зменшення проблеми високої циркулюючої енергії в існуючих топологіях ШІМ при невеликому навантаженні. Для запропонованого рішення кількість циркулюючої енергії адаптується до навантаження, що призводить до високої ефективності в діапазоні можливих робочих точок. Надано основні критерії та методику розрахунку параметрів схеми а також мінімальних інтервалів провідності ключів перетворювача. Алгоритми керування та експлуатаційні аспекти роботи перетворювача були представлені та перевірені експериментально.

Ключові слова: перетворювач постійного струму; м'яке перемикання; нульовий струм комутації; акумуляторна батарея; ZVS; ZCS.

DC-DC CONVERTER WITH WIDE ZVS RANGE

A. BLINOV^{1*}, D. VINNIKOV¹, V. IVAKHNO², V. ZAMARUIEV², B. STYSLO²

¹ Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics, Tallinn University of Technology, Tallinn, ESTONIA

² Industrial & Biomedical electronics dep., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT This paper introduced an isolated soft switching DC-DC converter with an active rectifier. The converter has two bidirectional and two reverse conducting devices at the inverter side and utilizes phase-shift control with one variable and constant switching frequency. Instead of relying on the magnetizing or circulating current, the soft-switching operation of the proposed converter using novel modulation method is provided by relatively short additional switching state, which minimizes the energy circulation. This interval is introduced by taking advantage of the reverse blocking capability of the devices in the rectifier side and ensures the recharge of snubber capacitance at the inverter side. The soft switching operation of the converter is load-independent and does not require introduction of multi-mode control strategies. Thanks to the novel modulation algorithm, the converter features ZVS and ZCS over a wide operating range, even at no-load condition. The solution is aimed to reduce the problem of high circulating energy in the existing PWM topologies at light load. For the proposed solution, the amount of circulating energy is load adaptive, which results in good weighted performance over a range of possible operating points. Operation and design aspects of the converter were presented and verified experimentally.

Keywords: dc-dc power converters; soft switching; zero current switching; zero voltage switching; batteries; ZVS; ZCS

Вступ

Підвищення енергетичної ефективності силових електронних систем може бути досягнуто за рахунок забезпечення сприятливих умов роботи силових ключів – їх перемикання в режимах нульової напруги або струму (ZVS/ZCS). Для DC/DC перетворювачів з проміжною ланкою змінного струму, одним з підходів, що розглядаються в літературі, є реалізація активного випрямляча з фазовим зсувом, що діє як інвертор струму [1], [2]. Такий підхід дозволяє досягти режиму ZVS ключів інвертора первинної ланки (інвертора напруги) і ZCS випрямних ключів вторин-

ної ланки. Динамічні втрати при вимиканні ключів вхідного інвертора можуть бути зменшені зовнішніми ємнісними снаберами, в той час як втрати в ключах вихідної ланки випрямляча зменшуються власною індуктивністю трансформатора, що діє в якості індуктивного снабера. У цих рішеннях амплітуда струму (нормалізованого) цих ланок ніколи не перевищує величину вхідного, що призводить до зниження циркуляції енергії. У той же час, при малих значеннях струму навантаження, значення цього струму недостатнє для перезаряду снаберів ключів інвертора напруги, і, відповідно, режим ZVS втрачається.

© А. Б. Блінов, Д. В. Вінніков, В. В. Івахно, В. В. Замаруєв, Б. О. Сτισло, 2019

Методи, запропоновані для вирішення цієї задачі, зосновані на забезпечення певного значення струму, що циркулює в трансформаторі і силових ключах (СК) протягом усього періоду холостого ходу. В якості альтернативного рішення для досягнення цієї ж мети може використовуватися струм намагнічування [3]. У випадку великих зовнішніх снаберних конденсаторів, цей струм необхідно збільшувати; таким чином, подібні системи зазвичай забезпечують перезарядження паразитної ємності транзистора для включення в режим ZVS, але вимикання інверторних транзисторів все одно відбувається в режимі жорсткої комутації [4] [5].

В даній роботі представлено новий метод керування для топології, що була представлена авторами в ряді робіт, зокрема [6]. Додатковий квазірезонансний інтервал дозволяє забезпечити перезарядження снаберних ємностей за будь-якого значення струму навантаження без істотного збільшення циркуляції енергії.

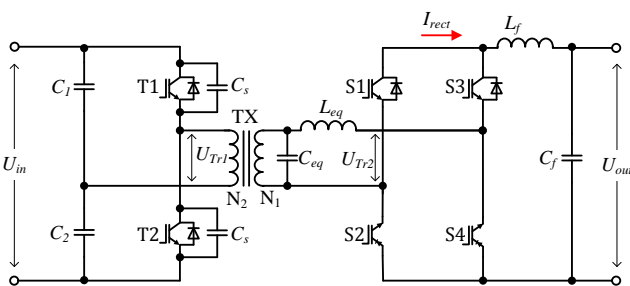


Рис. 1 – Пропонована двонаправлена асиметрична топологія перетворювача

Асиметричний перетворювач

Топологія перетворювача представлена на рис. 1. Топологія напівмостового інвертора на вході перетворювача забезпечує додаткове зниження напруги і зменшення коефіцієнта трансформації трансформатора, проте, застосування мостової топології на вході перетворювача не впливає на принцип роботи схеми. Вторинна ланка перетворювача виконана за мостовою схемою і містить два стандартних ключі і два - з зворотною блокуючою здатністю. Вихід перетворювача має індуктивний та ємнісний фільтри.

Загальноприйнятий принцип керування для цього перетворювача [6] подібний до принципу зсуву фази активного випрямляча, представленого в [3]. Деяка відмінність полягає в конфігурації ключів S2 і S4. У запропонованій топології вони розташовані в різних стійках мосту, таким чином, робочий цикл транзисторів випрямляча завжди має бути більшим за 0,5.

Основне обмеження звичайного фазового зсуву полягає в обмеженій можливості перемикачів при низьких значеннях струму навантаження.

Для досягнення ZVS повинні виконуватися наступні критерії:

$$E(L_{eq}) > E(C_{eq}) \Rightarrow \frac{L_{eq} \cdot I_{rect}^2}{2} > \frac{C_s / 2 \cdot U_{in}^2}{2}. \quad (1)$$

Припускаючи постійну величину напруги U_{in} , на певному рівні потужності, енергія, що зберігається в індуктивності L_{eq} , не зможе повністю розрядити снаберні ємності інверторних ключів і ZVS режим втрачається, як показано на рис. 2.

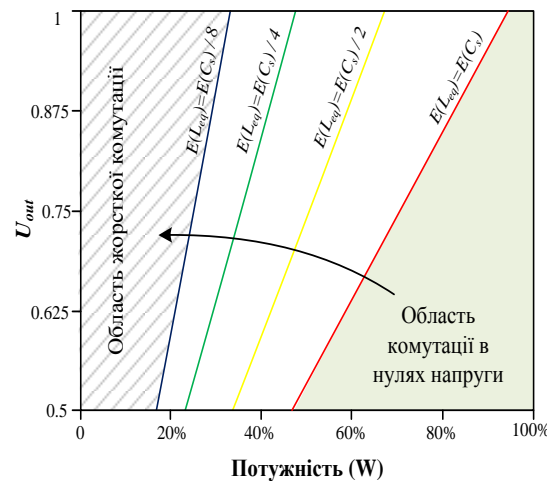


Рис. 2 – Узагальнені межі режиму ZVS інверторних транзисторів з використанням звичайного підходу

Як згадувалося, загальними шляхами зменшення впливу цього фактору є застосування трансформатора з підвищеним струмом намагнічування або підтримання певного струму в трансформаторі під час холостого ходу. Обидва ці підходи зазвичай призводять до надмірної циркуляції енергії.

Для подолання проблем, пов'язаних із традиційним підходом, пропонується нова стратегія керування. За допомогою модулюючих перемикачів S1 і S3 вводиться спеціальний резонансний перемикаючий стан для забезпечення перезарядки снаберних конденсаторів інвертора напруги. Принцип керування перетворювачем представлений на рис. 3, може бути описаний наступними режимами перемикачів для кожного напівперіоду $T_{sw} / 2$.

t_0-t_1 : S4 і T1 знаходяться у відкритому (ввімкненому) стані, а інші - вимкнені. Перетворювач знаходиться в активному стані і потужність передається на вихід через ключі T1, S4 і зворотний діод транзистора S1. Наприкінці цього інтервалу струм I_{rect} досягає максимального значення.

t_1-t_2 : T1 вимкнено, а S3 ввімкнено. Активний стан завершено і починається інтервал переходу. Протягом першої частини цього інтервалу відбувається резонансний процес між C_{eq} і L_{eq} . На відміну від існуючих методів, струм через S3 і зворотний діод S1 сумується із струмом навантаження, що зменшує час перезарядки ємності C_{eq} .

t_2-t_3 : Напряга V_{Tr1} трансформатора досягає амплітудного значення, а струм зменшується до $n \cdot I_{rect}$. Снаберні конденсатори перезаряджаються, і діод транзистора $T2$ знаходиться під прямим зміщенням. Струм навантаження переводиться з $S1$ до $S3$ зі швидкістю di/dt , обмеженою величиною індуктивності L_{eq} .

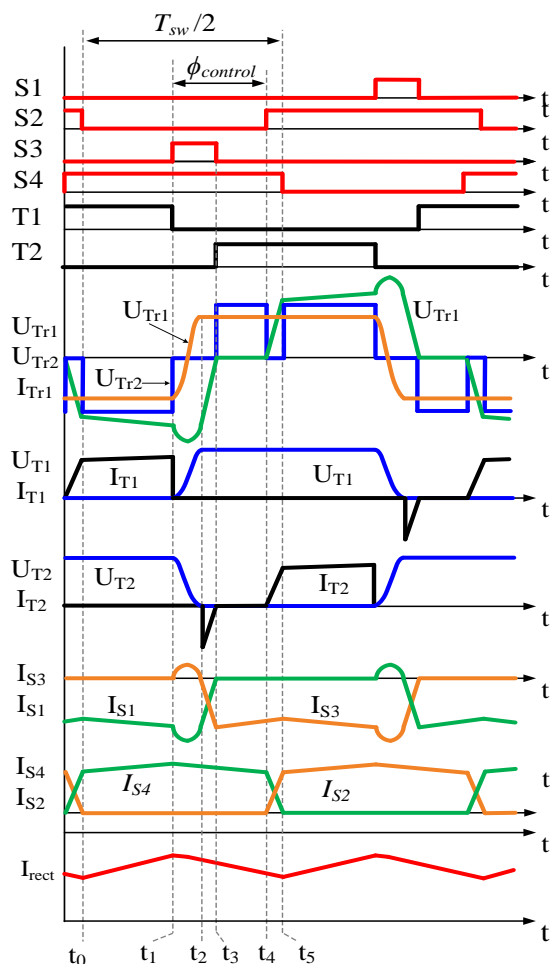


Рис 3 – Осцилограми роботи перетворювача з запропонованим методом керування.

t_3-t_4 : Переведення струму завершено, і струм діоду $T2$ спав до нульового значення. Перетворювач перебуває у стані холостого ходу, а струм навантаження протікає через $S4$, $S3$. Тривалість цього інтервалу може контролюватися фазовим зсувом між випрямлячем і перемикаючими ключами інвертора. $S3$ може бути вимкнений, а $T2$ можна вмикати в режимі ZVS.

t_4-t_5 : $S2$ увімкнено. Струм починає лінійно переходити від $S4$ до $S2$ зі швидкістю di/dt , обмеженою L_{eq} . Струм через $T2$ і трансформатор збільшується до номінального значення.

t_6 : Процес перехідного процесу завершено, а $S4$ може бути вимкнений в режимі ZCS. Перетворювач знаходиться в активному стані і описані процеси повторюються на наступному напівперіоді роботи схеми.

Запропонований спосіб забезпечує зарядку снаберних конденсаторів в межах інтервалу t_{res} (t_1-t_2) при будь-якому значенні навантаження без надмірного збільшення струму намагнічування. Оскільки резонансний інтервал збільшує результуючу тривалість стану холостого ходу, обмежуючим фактором для визначення параметрів резонансного контуру є результуючі часові інтервали робочого циклу, які обмежують можливість регулювання перетворювача. Більш того, менший коефіцієнт L_{eq}/C_{eq} збільшує амплітуду резонансного струму і збільшує циркуляцію енергії в схемі. Таким чином, необхідно досягти компромісу між згаданими обмеженнями та зменшенням втрат на вимкнення ключів інвертора.

Параметри і характеристики перетворювача

Наведені вище принципи керування було відтворено на основі маломасштабного перетворювача. Деякі параметри наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри моделі перетворювача

Параметр	Позначення	Величина
Вхідна напруга	U_{in}	480 VDC
Вихідна напруга	U_{out}	20-40 VDC
Частота перемикання	f_{sw}	50 kHz
Коефіцієнт трансформації	n	1:5.5
Максимальна потужність	P_{rated}	500 W
Вихідна потужність	P	50...500 W
Ключі ІН	T1-T2	STP18N60DM2
Ключі випрямляча	S1-S4	BSC035N10NS5

На величину коефіцієнта посилення перетворювача G впливають C_{eq} і L_{eq} . Втрати робочого циклу мають місце, зокрема, через наявність інтервалу t_4-t_5 тривалістю t_{ovl} одночасного ввімкнення $S2$ і $S4$:

$$t_{ovl} = \frac{2 \cdot n \cdot L_{eq} \cdot I_{rect}}{U_{in}}. \quad (2)$$

Тривалість резонансного інтервалу в загальному вигляді може бути оцінена так:

$$t_{1-2} = t_{res} = \frac{\frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{n \cdot I_{rect} \cdot Z_r}{U_{in}}\right)}{\pi \cdot f_r} \quad (3)$$

$$\text{де } Z_r = \sqrt{L_{eq} / C_{eq}} \text{ та } f_r = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{eq} \cdot C_{eq}}).$$

Відносна тривалість робочого циклу ключів інвертора D_{inv} може бути оцінена для найгіршого випадку, коли $I_{rect} = 0$, так:

$$D_{inv} < \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{f_{sw}}{f_r} \right). \quad (4)$$

Мінімальний фазовий зсув (в рад) обчислюється так:

$$\varphi_{min} = \omega \cdot (t_{res} + t_{ovl}). \quad (5)$$

Підсилення перетворювача в режимі заряду може бути оцінено так:

$$G = \frac{\pi - (\varphi + \omega \cdot t_{ovl})}{2 \cdot \pi \cdot n}. \quad (6)$$

де $\varphi \geq \varphi_{min}$ - кут зсуву фази між відповідними ключами інвертора і випрямляча.

Діаграми для величини теоретичного підсилення перетворювача представлено на рис. 4а. Діаграми для тривалості резонансного інтервалу представлені на рис. 4б. Як видно, резонансний період зростає зі зменшенням навантаження.

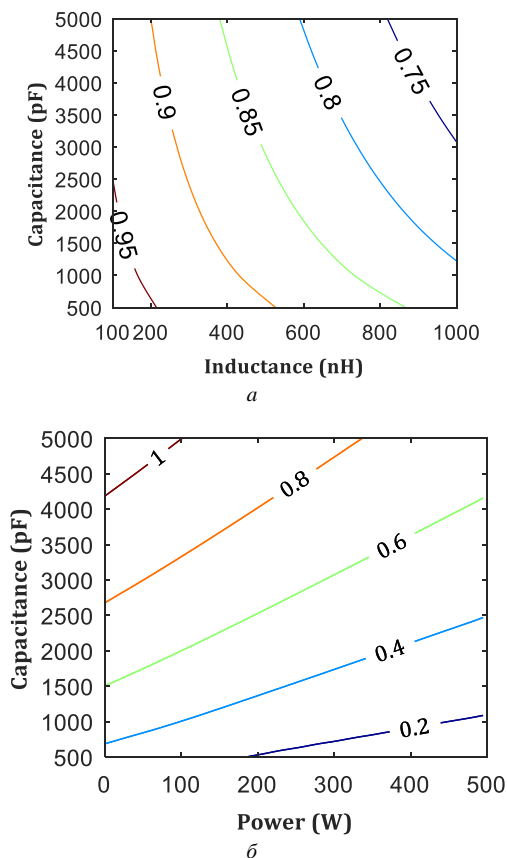
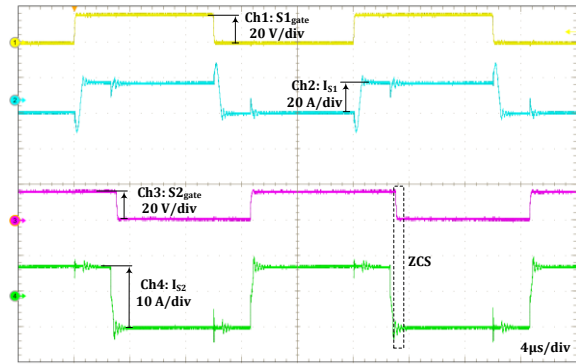
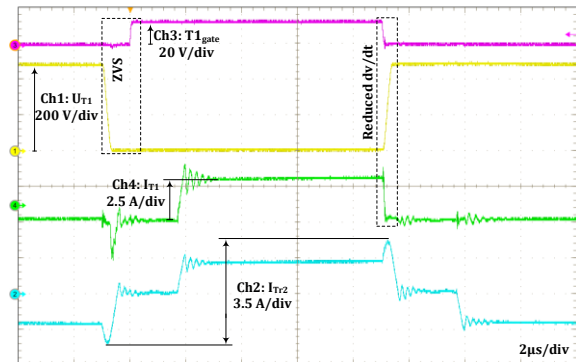


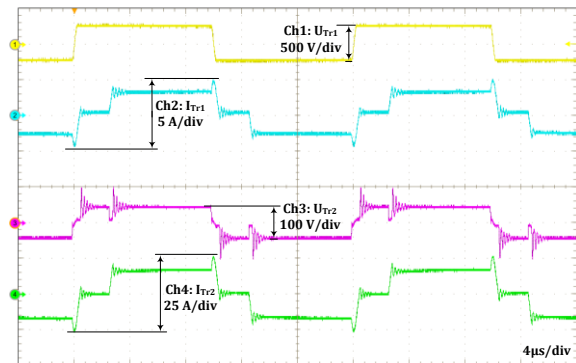
Рис. 4 – Нормовані граничні коефіцієнти посилення при номінальній потужності для різних значеннях індуктивності L_{eq} та ємності (а); тривалість резонансного інтервалу (мкс) в різних значеннях потужності та ємності C_s (б)



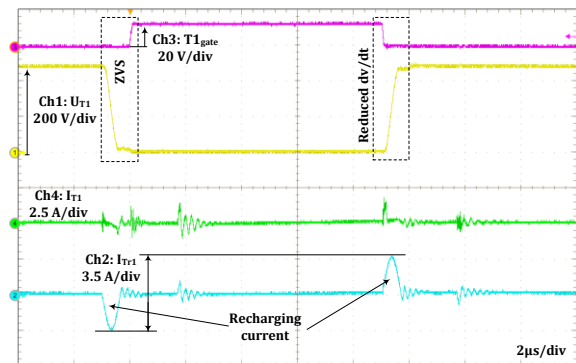
а



б



в



г

Рис. 5 – Експериментальні осцилограми в режимі ZCS транзисторів випрямної сторони (а), ZVS транзисторів на стороні інвертора (б), струмів трансформатора і напруг (в); робота без навантаження (г) ($U_{out} = 30B$, $P = 500 \text{ Wm}$).

Експериментальні дослідження

Для перевірки запропонованого перетворювача було зібрано і випробувано експериментальний прототип з номінальною потужністю 500 Вт. Компоненти і параметри прототипу представлені в таблиці 1. З метою зниження статичних втрат у вхідній ланці використовувалися MOSFET-транзистори. В якості ключів з зворотною блокуючою здатністю S2, S4 використовувалися два зустрічно-послідовно з'єднані MOSFET транзистори.

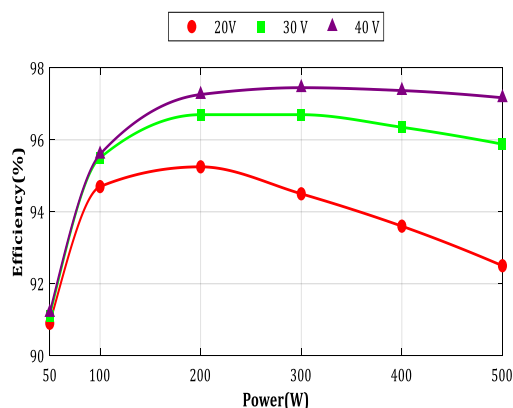


Рис. 6 – Ефективність роботи прототипу для різних вихідних напруг

Осцилограми роботи експериментального прототипу показані на рис. 5а. Рис. 5б демонструє вмикання транзистора T1 в режимі ZVS, а на рис. 5с представлені сигнали напруги і струму трансформатора, де спостерігається зміна полярності напруги на стороні інвертора під час резонансного інтервалу. Робота перетворювача при малому навантаженні представлена на рис. 5г. Час наростання напруги збільшується від 280 (при повному навантаженні) до 430 нс без навантаження, що узгоджується з аналізом (див. попередній розділ). Перезарядження конденсатора для забезпечення режиму ZVS відбувається, коли струм трансформатора знаходиться на своєму піковому значенні, і процес займає відносно короткий інтервал часу навіть при відсутності навантаження.

Ефективність роботи перетворювача при різних навантаженнях (рис. 6) від мінімальної аж до номінальної потужності визначалася при різних рівнях напруги випрямляча. При номінальній потужності прототип досягає максимального ККД 97,3%.

Висновки

На відміну від уснуючих рішень, забезпечення режиму м'якої комутації ключів при низькому значенні струму навантаження, що потребує збільшення намагнічуючого або циркулюючого струму, м'яке перемикавання ключів перетворювача здійснюється з використанням нового способу керування із відносно коротким додатковим станом перемикавання, що мінімізує циркуляцію енергії. Цей інтервал використовує

можливість зворотного блокування ключів на стороні випрямляча і забезпечує перезарядження снаберної ємності на стороні вхідного інвертора. Режим м'якого перемикавання ключів перетворювача слабо залежить від величини навантаження і не вимагають впровадження багаторежимних режимів керування.

Завдяки новому алгоритму керування, перетворювач працює в режимах ZVS і ZCS в широкому робочому діапазоні навантаження. Рішення спрямоване на зменшення величини циркулюючої енергії в існуючих топологіях ШІМ при малій величині потужності навантаження. Алгоритми керування та експлуатаційні аспекти роботи перетворювача були представлені та перевірені експериментально.

Список літератури/ References

1. Moiseev, S.; Soshin, K.; Sato, S.; Gamage, L.; Nakaoka, M.; "Novel soft-commutation DC-DC power converter with high-frequency transformer secondary side phase-shifted PWM active rectifier", *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol.151, no.3, pp. 260- 267, 8 May 2004.
2. A. Blinov, R. Kosenko, A. Chub and D. Vinnikov, "Bidirectional soft-switching dc-dc converter for battery energy storage systems," in *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 12, pp. 2000-2009, 16 10 2018.
3. T. Mishima, K. Akamatsu and M. Nakaoka, "A High Frequency-Link Secondary-Side Phase-Shifted Full-Range Soft-Switching PWM DC-DC Converter With ZCS Active Rectifier for EV Battery Chargers," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5758-5773, Dec. 2013.
4. J. Zhang and D. Sha, "A current-fed dual active bridge DC-DC converter using dual PWM plus double phase shifted control with equal duty cycles," *2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, Singapore, 2016, pp. 1-6.
5. S. Bal, D. B. Yelaverthi, A. K. Rathore and D. Srinivasan, "Novel Active Rectification for Extended ZVS Operation of Bidirectional Full Bridge DC/DC Converter for Energy Storage Application," *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, 2018*, pp. 2103-2109.
6. V. Ivakhno, V. Zamaruev, B. Styslo, A. Blinov "Asimmetrichnyy soglasuyushchiy dc/dc preobrazovatel' dlya sistem elektrosnabzheniya s nakopitel'nyami elektricheskoy energii" (Asymmetric matching DC/DC converter for electric power system with battery energy storage system) / *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: New solutions in modern technology*, 2018. – № 26 (1302), v. 1. – P. 48-56 DOI 10.20998/2413-4295.2018.26.07.

Інформація про авторів (About authors)

Блінов Андрій Борисович – кандидат технічних наук, Талліннський Технічний університет, старший науковий співробітник кафедри електроенергетики і мехатроніки; м. Таллінн, Естонія; e-mail: andrei.blinov@taltech.ee.

Andrei Blinov – Ph. D., senior researcher, Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia; e-mail: andrei.blinov@taltech.ee.

Вінніков Дмитро Валерійович – кандидат технічних наук, Талліннський Технічний університет, дослідник-професор кафедри електроенергетики і мехатроніки; м. Таллінн, Естонія; e-mail: dmitri.vinnikov@taltech.ee.

Dmitri Vinnikov – Ph. D., Researcher-Professor, Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia; e-mail: dmitri.vinnikov@taltech.ee.

Івахно Володимир Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: v-ivakhno@ukr.net.

Volodymyr Ivakhno – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Professor, Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: v-ivakhno@ukr.net.

Замаруєв Володимир Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: vvz@kpi.kharkov.ua.

Volodymyr Zamaruev – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Professor, Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: vvz@kpi.kharkov.ua.

Стисло Богдан Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; e-mail: bohdanstyslo@gmail.com.

Bohdan Styslo – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Department of "Industrial and Biomedical Electronics", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: bohdanstyslo@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Блінов, А. Б. DC-DC перетворювач з широким діапазоном забезпечення режиму природної комутації в нулях напруги / **А. Б. Блінов, Д. В. Вінніков, В. В. Івахно, В. В. Замаруєв, Б. О. Стисло** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 14-19. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.02.

Please cite this article as:

Blinov, A., Vinnikov, D., Ivakhno, V., Zamaruev, V., Styslo, B. DC-DC converter with a wide range of providing a natural switching mode at ZVS mode. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 14-19, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.02.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Блинов, А. Б. DC-DC преобразователь с широким диапазоном обеспечения режима естественной коммутации в нулях напряжения / **А. Б. Блинов, Д. В. Винников, В. В. Ивахно, В. В. Замаруєв, Б. А. Стисло** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 14-19. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.02.

АННОТАЦІЯ. В статті описан принцип і режими роботи DC-DC преобразователя с промежуточным звеном переменного тока, традиционным входным инвертором напряжения и активным выпрямителем во вторичном звене. Конвертор имеет асимметричную структуру в звене выходного инвертора. Управление ключами двух звеньев осуществляется с фазовым сдвигом. Обеспечение режима мягкой коммутации силовых ключей обоих звеньев преобразователя при малой величине мощности нагрузки происходит без чрезмерного значения намагничивающего или циркулирующего тока. Новый принцип управления преобразователем позволяет обеспечивать режимы мягкой коммутации ключами обоих звеньев при широком диапазоне изменения тока нагрузки, в том числе при близкой к нулю мощности нагрузки. Режим работы преобразователя имеет короткий дополнительный интервал коммутации, минимизирующий циркуляцию энергии. Этот интервал обеспечивает перезаряд снаберной емкости на стороне инвертора напряжения. Решение направлено на уменьшение проблемы выскокой циркулирующей энергии в существующих топологиях ШИМ при небольшой нагрузке. Для предложенного решения количество циркулирующей энергии адаптируется к нагрузке, что приводит к высокой эффективности в диапазоне возможных рабочих точек. Предоставлено основные критерии и методику расчета параметров схемы а также минимальных интервалов проводимости ключей преобразователя. Алгоритмы управления и эксплуатационные аспекты работы преобразователя были представлены и проверены экспериментально.

Ключевые слова: преобразователь постоянного тока; мягкое переключение; нулевой ток коммутации; аккумуляторная батарея; ZVS; ZCS

Надійшла (received) 08.07.2019